



19 BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENT- UND
MARKENAMT

12 Offenlegungsschrift
10 DE 199 25 790 A 1

21 Aktenzeichen: 199 25 790.6
22 Anmeldetag: 5. 6. 1999
43 Offenlegungstag: 7. 12. 2000

51 Int. Cl. 7:
H 01 J 37/32
B 23 K 10/00
H 05 H 1/46
C 23 F 4/00

DE 199 25 790 A 1

71 Anmelder:
Institut für Oberflächenmodifizierung e.V., 04318
Leipzig, DE

72 Erfinder:
Böhm, Georg, Dipl.-Phys., 04299 Leipzig, DE; Frank,
Wilfried, Dipl.-Phys. Dr., 04209 Leipzig, DE;
Schindler, Axel, Dipl.-Phys. Dr.-habil., 04668
Großbothen, DE; Bigl, Frieder, Dipl.-Phys. Prof. Dr.,
04249 Leipzig, DE

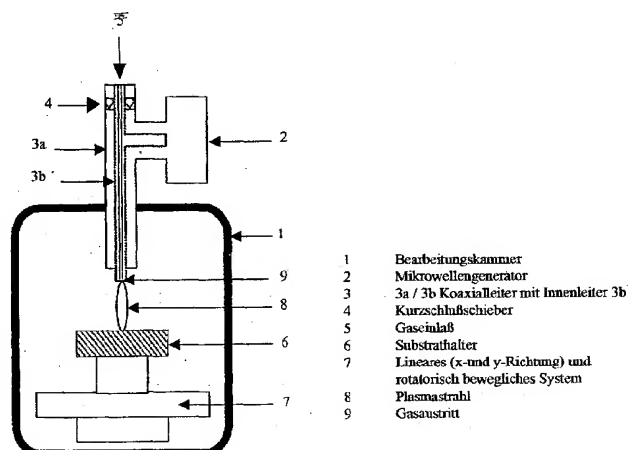
56 Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht
zu ziehende Druckschriften:

DE	195 11 915 C2
DE	39 05 303 C2
DE	196 41 439 A1
DE	40 04 560 A1
DE	38 73 193 T2
FR	25 47 693 A1
US	53 02 237
US	50 63 329
US	46 11 108
EP	07 10 054 A1
WO	97 45 856 A1

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

54 Verfahren und Vorrichtung zur Bearbeitung von optischen und anderen Oberflächen mittels
Hochrate-Plasmaprozessen

57 Das erfindungsgemäß entwickelte Verfahren zur Hoch-
ratepräzisionsbearbeitung optischer und anderer Mate-
rialien auf der Basis eines durch plasmachemische Reak-
tionen hervorgerufenen Abtrags oder Auftrages von Sub-
stratmaterial von der Oberfläche bzw. auf die Oberfläche
verwendet als Werkzeug eine erfindungsgemäße Plasma-
strahlquelle, die einen hochreaktiven, formstabilen rotati-
onssymmetrischen, räumlich vom erzeugenden System
überwiegend getrennten lokalisierten Gasentladungs-
plasmastrahl durch ein Mikrowellenfeld am offenen Ende
eines koaxialen Mikrowellenhohlleiters erzeugt gespeist
wird, wobei der Innenleiter des Koaxialleiters so aufge-
baut ist, daß in seinem Inneren zwei oder mehrere reakti-
ve und/oder inerte Arbeitsgase separat an das als Düse
wirkende, offene Ende des Innenleiters geführt werden
können. Der Wirkungsquerschnitt des durch Wechselwir-
kung der ausströmenden Gase mit dem Mikrowellenfeld
erzeugten Gasentladungsplasmas mit der Substratober-
fläche ist in der Regel kleiner als die Abmessungen der
Substratoberfläche und deren Formgebung durch Abtrag
oder Auftrag erfolgt dadurch, daß Substrat und Werkzeug
relativ zueinander mit wechselnder oder konstanter Ge-
schwindigkeit linear und/oder rotierend bewegt werden.
Auf Grund der axialen Dimension des Plasmastrahls von
bis zu einigen zehn Millimetern kann dabei der Abstand
zwischen Gasaustritt und Substratoberfläche so groß ge-
wählt werden, daß auch die Bearbeitung stark gekrümm-
ter oder strukturierter Oberflächen ...



Schematische Darstellung einer Anordnung zur Hochratebearbeitung mittels des
Plasmastrahlverfahrens mit Anordnung der Plasmaquelle in der Wand der Bearbeitungskammer.

DE 199 25 790 A 1

Beschreibung

Anwendungsgebiet

Die Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Vorrichtung für die lokale Bearbeitung von Oberflächen mit hoher Abtrag- bzw. Abscheiderate mittels eines reaktiven, mikrowellenangeregten Plasmastrahles.

Stand der Technik

Bekannte Bearbeitungsverfahren zur Herstellung präziser Oberflächenformen von Substraten oder auch Schichten insbesondere in der Optik, der Mikroelektronik oder der Mikrosystemtechnik sind bei materialabtragenden Verfahren neben den abrasiven Methoden Schleifen, Läppen, Polieren, Einkorndiamantdrehen oder -fräsen, naßchemische Ätzverfahren oder auch Ionen- bzw. Ionenstrahlätzverfahren bzw. Verfahrenskombinationen wie das chemomechanische Polieren. Bei den Abscheideverfahren sind das vor allem chemische Abscheideverfahren, CVD, physikalische Sputtering-Abscheidemethoden bzw. Laser- oder Plasmaabscheideverfahren. Plasmaverfahren haben sich in diesem Spektrum der Technologien als besonders vorteilhaft hinsichtlich hoher Prozeßgeschwindigkeiten infolge hoher Abtrag- bzw. Abscheideraten, hinsichtlich weitestgehender Materialschonung der bearbeiteten Substratoberflächen bzw. Schichten (kein mechanischer Kontakt zur Oberfläche bei der Bearbeitung) und auch hinsichtlich einer guten Steuerbarkeit (lokale sequentielle Bearbeitung mit oder ohne Masken) erwiesen.

Der Vorteil der Plasmaverfahren im Vergleich zu den Ionenverfahren liegt in der geringen kinetischen Energie der Ionen im Plasma und die dadurch bedingte geringe Schädigung oberflächennaher Schichten, wobei die Ionenenergie im Plasma mit steigender Anregungsfrequenz abnimmt. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, in Abhängigkeit vom Druck (bis zum Normaldruck), Plasmen mit hoher Dichte an reaktiven Spezies zu erzeugen und damit hohe Abtrags- bzw. Abscheideraten zu realisieren und gleichzeitig den technischen Aufwand hinsichtlich der Vakuumtechnik beträchtlich zu reduzieren.

Dabei ist die von Zarowin und Mitarb. zur Erzeugung von Plasmen mit lokaler Wirkung verwendete Diodenanordnung [US Pat.-Nr.: 4,668,366], bei der die zu bearbeitende Oberfläche entweder direkt eine Elektrode einer HF-Parallelplattenanordnung selbst ist oder auf einer solchen montiert ist, nur unter Verlust des oben genannten Vorteils der geringen Ionenenergien einsetzbar. Ein entscheidender weiterer Nachteil ergibt sich bei sehr dicken und/oder dickeninhomogenen dielektrischen Substraten durch die damit verbundene starke bzw. inhomogene Schwächung des elektrischen HF-Feldes und damit der Ätzwirkung, die bei dieser Methode vor allem durch die kinetische Energie der Ionen bestimmt wird. Eine Alternative bieten sogenannte "downstream"-Anordnungen, bei denen das Plasma innerhalb einer vom Substrat unabhängigen, an einer Seite offenen Elektrodenanordnung erzeugt wird, infolge des Drucks der nachströmenden Gase an der offenen Seite mehr oder weniger weit austritt und dort mit der Substratoberfläche in Kontakt gebracht werden kann, wobei sich in Abhängigkeit von der gewählten Geometrie eine lokal begrenzte Wirkung z. B. in Form eines rotationssymmetrischen Abtragsprofils ergibt.

Darauf aufbauend ist in einer Reihe von Veröffentlichungen und Patenten der Gruppe um C. B. Zarowin die Formbearbeitung insbesondere optischer Oberflächen durch gezielte Überlagerung eines lokalen Materialabtrags in Verbindung mit Verweilzeitmethoden dargelegt ["Rapid, Nonmechanical, Damage Free Figuring of Optical Surfaces using

Plasma Assisted Chemical Etching (PACE)"; Parts I-II SPIE vol. 966 Advances in Fabrication and Metrology for Optics and Large Optics (1988); pp. 82-97, Bollinger, et al.; "Predicted Polishing Behavior of Plasma Assisted Chemical Etching (PACE) from a Unified Model of the Temporal Evolution of Etched Surfaces"; SPIE vol. 966 Advances in Fabrication and Metrology for Optics and Large Optics (1988) pp. 98-107, Gallatin, et al.; "Rapid, Non-Contact Damage Free Shaping of Optical & Other Surfaces with Plasma Assisted Chemical Etching" Proceedings of the 43rd Annual Symposium on Frequency Control (1989); IEEE pp. 623-626, Zarowin, et al.; "Rapid, Noncontact Optical Figuring of Aspheric Surfaces With Plasma-Assisted Chemical Etching", D. L. Bollinger, G. M. Gallatin, J. Samuels, G. Steinberg, C. B. Zarowin, Hughes Danbury Optical Systems, Inc., from SPIE vol. 1333 Advanced Optical Manufacturing and Testing (1990), pp. 2-14.; C. B. Zarowin, "Basis of Macroscopic and Microscopic Surface Shaping and Smoothing by Plasma Assisted Chemical Etching," J. Vac. Sci. Technol. B 12(6), Nov./Dec. 1994, pp. 3356-3362.; sowie die Patentschriften US 5,290,382, US 5,291,415, US 5,336,355, US 5,375,064, US 5,376,224, US 5,811,021]. Die dort beschriebenen Verfahren verwenden als Werkzeug ein RF-Plasma, das in einer nach einer Seite offenen Kammer aus einem Gemisch von Inert- und/oder Reaktivgasen geeigneter Zusammensetzung erzeugt wird, wobei sich infolge der gewählten Geometrie nur ein sehr geringer Teil des Plasmavolumens im Abstand von einigen Zehntelmillimetern bis wenige Millimeter außerhalb dieser Kammer befindet. Der Querschnitt der Wechselwirkung des austretenden Plasmas mit der im etwa gleichen Abstand gegenüber der offenen Seite der Plasmakammer befindlichen Substratoberfläche ist dabei kleiner als deren Abmessungen, und die Bearbeitung erfolgt durch geeignete Überlagerung der räumlich begrenzten Wirkungsquerschnitte in der Plasmakammer und Substratoberfläche relativ zueinander bewegt werden. Um unerwünschte Wechselwirkungen des in der Kammer befindlichen, reaktiven Plasmas mit den Kammerwänden, die gleichzeitig als Elektroden dienen, zu verhindern, müssen spezielle Werkstoffe eingesetzt werden [US 5,364,496]. Als erreichbare Ätzraten werden für optische Materialien und Halbleiter (Si, SiO₂) 3 µm/min angegeben, höhere Raten sind durch NF₃-Zumischungen erreichbar, allerdings mit dem Nachteil einer nur schwer kontrollierbaren Geometrie der Abtragsfunktion im Randbereich.

Wird die Geometrie der "downstream"-Anordnung dahingehend geändert, daß die Öffnung in der Elektrodenanordnung als Düse wirkt, durch die das im Inneren erzeugte Plasma infolge des Gasdrucks mit hoher Geschwindigkeit austritt, spricht man von einer Plasmastrahl-Anordnung. Der Vorteil einer solchen Anordnung besteht darin, daß auf Grund der axialen Dimension des erzeugten Plasma-Strahls mit einer Länge von einigen Millimetern bis einige Zentimeter die Bearbeitung von Substratoberflächen bei entsprechend größerem Abstand möglich ist. Damit eignen sich Plasmastrahlverfahren insbesondere für die lokale Bearbeitung strukturierter und gekrümmter Oberflächen.

Bárdos et al. berichten über die lokale Ätzwirkung eines durch eine HF-angeregte Hohlkathodengasentladung gebildeten reaktiven Plasmastrahls auf Silizium ["Superhigh-rate plasma jet etching of silicon", L. Bárdos, S. Berg, and H.-O. Blom, Appl. Phys. Lett. 55, 1615 (1989)] ohne allerdings Angaben über die Anwendung des Verfahrens zur gezielten Formbearbeitung Si-haltiger Oberflächen zu machen.

Takino et al. ["Computer numerically controlled plasma chemical vaporization machining with a pipe electrode for optical fabrication", Appl. Optics 37, 5198 (1998)] beschrei-

ben die Formbearbeitung optischer Oberflächen mit Hilfe einer Plasmastrahl-Anordnung die bei hohem Druck (600–1000 mbar) betrieben wird und bei der ein Gasgemisch aus Helium und SF₆ im Verhältnis 99 : 1 bei einem He-Fluß von 5 sl/min durch ein HF-gekoppeltes Rohr mit einem Innendurchmesser von wenigen Millimetern geführt wird und bei Austritt aus dem Rohr einen Plasmastrahl formt. Im Abstand von wenigen Zehntelmillimetern bis etwa 2 Millimeter ergibt sich eine signifikante Ätzwirkung insbesondere gegenüber der Rohrwandung auf Grund der erhöhten Sputterwirkung einer sich in diesem Bereich ausbildenden Plasmarandschicht mit erhöhter Ionenenergie. Die angegebenen Ätzraten liegen im Bereich von 2.5 mm³/h.

Nachteile des Standes der Technik

Das für die lokale Formbearbeitung von Substratoberflächen mit Hilfe reaktiver Plasmen verwendete Verfahren nach Zarowin et al. beinhaltet im wesentlichen folgende Nachteile: (i) dadurch, daß das erzeugte Plasma nur einige Zehntelmillimeter bis wenige Millimeter über den Rand der Öffnung in der Elektrodenanordnung austritt, wird eine sehr starke Abstandsabhängigkeit der lokalen Wirkung der Plasmen von der Substratoberfläche sowie eine damit verbundene starke Abhängigkeit von Vibrationen der Anordnung, wie sie z. B. bei hohen Scangeschwindigkeiten der Mehrachsenbewegung auftreten können, bewirkt, was eine sehr aufwendige Regelung zur Erzielung einer hohen Bearbeitungsgenauigkeit erforderlich macht und zum anderen die gesamte Dynamik der Bearbeitung begrenzt; (ii) Kontaminationsgefahr der bearbeiteten Oberfläche mit Fremdverunreinigungen, die vor allem aus der Wechselwirkung des intensiven lokalen Plasmas mit Konstruktionswerkstoffen der Plasmaquelle resultieren (besonders verstärkt wird ein solcher Ätzangriff der Reaktivspezies mit den Plasmaquellenwänden bei der Ausprägung von intensiven Hohlkathodenentladungen), damit verbunden (iii) erhebliche Probleme bei der Gewährleistung einer zeitlich und geometrisch stabilen Abtragfunktion des Plasmawerkzeuges infolge der Geometrieänderung der Plasmaquellenbauteile und (iv) ein hoher Verschleiß der präzisionsmechanischen Bewegungssysteme durch Korrosion infolge hochreaktiver Spezies, die bis zu diesen Teilen gelangen bzw. zur Vermeidung dessen ein hoher gerätetechnischer Aufwand durch geeignete mechanische Schutzvorrichtungen.

Das von Takino und Mitarb. beschriebene Verfahren "Computer numerically controlled plasma chemical vaporization machining with a pipe electrode for optical fabrication" hat die entscheidenden Nachteile einer geringen Volumenabtragrate, die auch mit anderen, technisch einfacheren Verfahren (Ionenstrahlbearbeitung) erreichbar ist und einer sehr ungünstigen Geometrie des Abtragprofils in Form eines "Hohlstrahles", was zu erheblichen Problemen bei der Oberflächen-Präzisionsbearbeitung führt (mathematische Entfaltung, Bearbeitung kleiner Oberflächendetails).

Andererseits läßt sich der in (ii) beschriebene Nachteil der Kontamination der bearbeiteten Oberfläche bei intensiven Hohlkathodenentladungen bei bewußter Ausnutzung als technologisch vorteilhafte Variante zur lokalen Bearbeitung durch Materialabscheidung anwenden. Ein Patent von Bárdos und Mitarb. (EP 00,166,349) beschreibt ein solches Verfahren, wobei die Röhrenelektrode gleichzeitig als Opfermaterial zur Beschichtung dient.

Aufgabe der Erfindung

Aufgabe der Erfindung ist die Entwicklung eines Bearbei-

tungsverfahrens hoher Rate und einer diesbezüglichen Vorrichtung für die präzise, plasmastrahlgestützte Formbearbeitung planer oder gekrümmter bzw. glatter oder strukturierter Oberflächen von Substraten oder Schichten, z. B. Quarz, Si, SiC, GaAs oder andere, wobei die genannten Nachteile der bekannten technischen Lösungen überwunden werden sollen. Dies betrifft ebenfalls sowohl die Nachteile bekannter Lösungen hinsichtlich kurzer Lebensdauern präzisionsmechanischer Teile der Plasmaanlage, wie Translations- und Rotationstische und deren Elektronikkomponenten in der Bearbeitungskammer durch die Einwirkung langlebiger korrosiver chemischer Spezies, die sich in dem Gefäß ausbreiten, als auch die Nachteile zerstörerischer Wirkungen abgestrahlter Mikrowellenleistung auf elektronische Komponenten und organische Konstruktionsmaterialien in der Bearbeitungskammer.

Lösung der Aufgabe

Die gestellte Aufgabe wird dadurch gelöst, daß mit einer erfindungsgemäßen Vorrichtung (Plasmastrahlquelle) ein hochreaktiver Plasmastrahl definierter und skalierbarer Geometrie sowie hoher Dichte mit Hilfe eines Mikrowellenfeldes erzeugt wird, daß sich am Ende eines nach einer Seite offenen, coaxialen Mikrowellenhohlleiters, bestehend aus einem Außenleiter und einem Innenleiter geeigneter Geometrie, ausbildet, wobei der Innenleiter des Koaxialleiters aus zwei oder mehreren konzentrisch zueinander angeordneten Rohren geeigneter Querschnitte aufgebaut ist. Die Bildung des reaktiven Plasmastrahls erfolgt erfindungsgemäß durch Eindiffusion eines Gases, das über eines der äußeren Rohre zugeführt wird, in den durch Wechselwirkung eines Inertgasstromes mit dem Mikrowellenfeld gebildeten Plasmastrahl, der dadurch gleichzeitig eine zeitlich und räumlich stabile Form mit einer axialen Ausdehnung von wenigen Millimetern bis zu einigen Zentimetern erhält. Dieses Gas enthält entweder die chemisch reaktiven Spezies bzw. es entstehen solche in der Plasmaentladung aus mindestens einem seiner Bestandteile. Von besonderer Wichtigkeit der erfindungsgemäßen Lösung ist es, daß der hochreaktive Plasmastrahl selbst keinen Kontakt mit dem System des Mikrowellenleiters bzw. des darin integrierten Gasführungssystems hat. Damit ist der im Vergleich zum bekannten Stand der Technik besonders vorteilhafte Aspekt der erfindungsgemäßen Lösung verbunden, daß das Plasma keinerlei Wandwechselwirkung außer mit dem Substrat selbst eingeht und demzufolge (1.) eine Kontamination mit chemischen Verunreinigungen sowohl des Plasmas als auch damit der Substratoberfläche unterbleibt und (2.) eine Übertragung der Wärme aus dem Plasmastrahl auf die Teile der Plasmastrahlquelle vermieden wird, was eine technisch aufwendige Kühlung der Umgebung des Plasmastrahlaustritts an der Plasmaquelle erübrigt.

Der Schwerpunkt der Anwendung liegt auf der effizienten Erzeugung vorwiegend präziser asphärischer Oberflächengeometrien großer Abweichung von der Ausgangsgeometrie durch reaktiven Ätzabtrag des Materials. Aus ökonomischer Sicht stehen dabei kurze Bearbeitungszeiten durch Erreichen hoher Ätzabtragraten, große Langzeitstabilität des Plasmastrahles und seine hochgenaue Steuerbarkeit sowie eine minimale Wartung und einfache Handhabung der Ätzvorrichtung im Vordergrund. Der Wirkungsquerschnitt des erzeugten reaktiven Plasmastrahls mit der Substratoberfläche ist kleiner als die Abmessungen der Substrate. Er kann aber auch die Größe der Werkstücke bei kleinen Werkstücken haben bei erfindungsgemäßen weiteren Gestaltungsformen des Mikrowellenleiters gemäß den bekannten technischen Prinzipien der Oberflächenwellenleiter (SURFA-

TRON-Prinzip, siehe z. B. M. Moisan, J. Margot and Z. Zakrzewski "Surface Wave Plasma Sources" in O. A. Popov (Ed.) "High Density Plasma Sources", Noyes Publications, Park Ridge, NJ, USA, 1995 insbes. Seiten 217–246).

Die Substratformgebung durch Abtrag erfolgt erfindungsgemäß dadurch, daß das Substrat, das sich in einem Substrathalter befindet, der vorteilhafterweise mit einer Substratheizung ausgestattet sein kann, und das Werkzeug (Plasmastrahl) relativ zueinander mit wechselnder oder konstanter Geschwindigkeit linear und/oder rotierend bewegt werden. Das geschieht in einem Vakuumgefäß bei einem Druck im Bereich zwischen 10 mbar und 1000 mbar, wobei die relative Bewegung zwischen Substrat und Plasmastrahlquelle, die sich erfindungsgemäß druckgekapselt im gleichen Vakuumgefäß befindet, durch ein rechnergesteuertes Bewegungssystem realisiert wird.

Unter bestimmten Umständen ist es zweckmäßig, daß diese Substratformgebung durch Ätzastrag bei höheren Substrattemperaturen erfolgt.

Obwohl die hier insbesondere in dem Ausführungsbeispiel näher beschriebene technische Lösung auf ein Hochrateätzverfahren abhebt ist die erfinderische Lösung mit den gleichen technischen und ökonomischen Vorteilen zur Abscheidung von Materialien zur Formbearbeitung anwendbar, wenn man entsprechend geeignete Gase, die die abzuscheidenden elementaren oder molekularen Spezies enthalten, einsetzt.

Neben der in dem Ausführungsbeispiel angegebenen technischen Lösung zur lokalen Oberflächenbearbeitung durch eine verweilzeitgesteuerte Relativbewegung zwischen Substrat und Plasmastrahlquelle ist das erfindungsgemäße Verfahren ebenso mit Masken- bzw. Blendentechniken (z. B. Wechselmasken aus Al-Oxidkeramik versehen mit geometrischen Lochstrukturen) anwendbar um z. B. tiefe geometrische Strukturen oder Strukturarrays mit hoher Bearbeitungsgeschwindigkeit und Genauigkeit in Substratmaterialien einzuarbeiten. Dabei ist wiederum das erfindungsgemäße Verfahren sowohl als Hochrateabtrag als auch als Hochrate-Abscheideverfahren anwendbar. Für besonders komplexe Bearbeitungsformen bzw. zur Bearbeitung großer Flächen sind auch Kombinationen z. B. der Relativbewegung Plasmaquelle-Substrat bei gleichzeitigem Einsatz einer strukturierten Wechselmaske des erfindungsgemäßen Verfahrens anwendbar, wobei sich zusätzliche technische bzw. verfahrensökonomische Vorteile gegenüber dem bekannten Stand der Technik ergeben.

Die Aufgabe des Korrosionsschutzes empfindlicher und teurer mechanischer Bewegungssysteme in der Bearbeitungskammer wird erfindungsgemäß dadurch gelöst, daß die gesamte Anlage während der Bearbeitung mit einem inertisierenden bzw. abschirmenden Hintergrundgasdruck beaufschlagt wird, wobei dieser Druck erfindungsgemäß dadurch hergestellt wird, daß ein geeignetes Gas mit der Schutzwirkung über Leitungen und Öffnungen direkt in die Gehäuse der präzisionsmechanischen, elektronischen und auch optischen und optoelektronischen Komponenten eingelassen wird von wo aus es durch vorhandene Öffnungen in den Raum der Bearbeitungskammer ausströmt. Damit wird eine effektive Spülung der schutzwürdigen Komponenten mit Frischgas gewährleistet und ein Kontakt mit korrosiven Bestandteilen effizient ausgeschlossen. Das Schutzgas, hier wurde in dem Ausführungsbeispiel Stickstoff aus einem Flüssiggastank verwendet, wird zusammen mit den anderen Gasbestandteilen in der Bearbeitungskammer über das Pumpsystem daraus entfernt. Der zerstörerische, schädliche Einfluß abgestrahlter Mikrowellenenergie auf Elektronikkomponenten und Kunststoffteile in der Bearbeitungskammer wird erfindungsgemäß dadurch unterdrückt bzw. ausge-

schaltet, daß ein hinreichend dimensionierter Absorber für die vagabundierende Mikrowellenstrahlung in der Bearbeitungskammer installiert wird. In dem beschriebenen Ausführungsbeispiel ist das ein wasserdurchflossener Kunststoffschlauch, der in mehreren Windungen in einigen Zentimetern Abstand von der Wand der Bearbeitungskammer angebracht wurde.

Vorteile der Erfindung

Die Vorteile der Erfindung bestehen darin, daß ein reaktiver Plasmastrahl hoher Dichte und in gewissen Grenzen skalierbarer Dimension unter Vermeidung parasitärer und damit meist nachteiliger erosiver Plasma-Wand-Wechselwirkungen erzeugt wird, mit dessen Hilfe plane, strukturierte und auch gekrümmte Oberflächen leitender und nichtleitender Substrate mit lateralen Abmessungen in einem großen Bereich von Millimetern bis zu Metern durch Überlagerung lokaler Wirkungsprofile mit Halbwertsbreiten von ca. 1 mm bis einige 10 mm mit hohen Abtragraten bis zu 20 mm³/min oder auch Auftragraten präzise formbearbeitet werden können ohne ungewollte Kontamination der Werkstückoberfläche durch Konstruktionsmaterialien und ohne einen kritischen Einfluß des Abstandes zwischen Substrat und Gasaustritt aus der Plasmastrahlquelle während des Bearbeitungsprozesses, da hier im Gegensatz zu bekannten Lösungen keine kritische Abhängigkeit des Wirkungsquerschnittes von diesem Abstand besteht. Weitere Vorteile der Erfindung sind die vergleichsweise zu beschriebenen Lösungen unaufwendigen Maßnahmen zum Schutz teurer Gerätekompenten in der Bearbeitungskammer vor korrosiven Gasspezies und vor ungewollter Mikrowellenbestrahlung.

Teil B: Beispielbeschreibung

Beispiel 1

Im folgenden wird anhand eines Beispiels die Herstellung einer optischen Asphäre mit Hilfe des reaktiven Plasmastrahlätzens beschrieben. **Abb. 1** zeigt schematisch die dazu verwendete Anordnung, bestehend aus einer vakuumtauglichen Bearbeitungskammer (1) aus korrosionsfestem Edelstahl, in der sich computergesteuert eine linear (x- und y-Richtung) und rotatorisch bewegliche sowie heizbare Werkstückaufnahme (6, 7) befindet und einem über einen Kurzschiußschieber (4) automatisch abstimmbaren Mikrowellensystem, bestehend aus einem Koaxialleiter (3a, 3b), dessen offenes Ende (9) sich ebenfalls innerhalb der Vakuumkammer befindet, sowie einem Mikrowellengenerator (2), der unmittelbar an das Koaxialsystem gekoppelt ist. Die Zuführung (5) der verwendeten Inert- bzw. Reaktivgase Ar/He bzw. SF₆/CF₄ an das Ende des Koaxialleiters erfolgt über den Innenleiter (3b) der im Beispiel als doppelwandiges Rohr ausgebildet ist. Typische Prozeßparameter sind in Tab. 1 zusammengestellt.

Ein Beispiel für das Querschnittsprofil der Abtragsfunktion des Plasmastrahls (8) ist in **Abb. 2** dargestellt. Typische Abtragraten bei Quarz oder auch bei Siliziumkarbid sind 1–4 µm/s bei Halbwertsbreiten von 5–10 mm. Die resultierenden Volumenabtragraten liegen im Bereich von 1–20 mm³/min. Die axiale Dimension des Plasmastrahls beträgt in Abhängigkeit von den Prozeßparametern wenige Millimeter bis einige Zentimeter. Typisch sind ca. 20 mm. Die gezielte Überlagerung der lokalen Abtragsfunktionen zur Formgebung großflächiger Substrate erfolgt durch die computergesteuerte Bewegung des Substrats relativ zum Plasmastrahl zur Realisierung der, auf der Basis der lokalen

Abtragsfunktion, mathematisch simulierten, mittleren lokalen Verweilzeiten. Im vorliegenden Beispiel erfolgte diese Bewegung in Form des in **Abb. 3** skizzierten Mäanders. **Abb. 4** zeigt eine mit Hilfe des reaktiven Plasmastrahlätzens hergestellte Oberflächenform mit einer Bearbeitungstiefe von ca. 30 µm. Als Werkstück diente eine Scheibe aus poliertem Quarz mit einem Außendurchmesser von ca. 140 mm und einer Dicke von ca. 25 mm. Die Bearbeitungszeit betrug ca. 2 Stunden.

Beispiel 2

Das komplette Mikrowellensystem zur Erzeugung eines reaktiven Plasmastrahles (Plasmaquelle) kann sich zur Durchführung der Substratbearbeitung, die wie in Beispiel 1 beschrieben durchgeführt wird, auch in der vakuumtauglichen Bearbeitungskammer (**Abb. 1, (1)**) befinden. Dazu werden die einzelnen Komponenten in einen vakuumdichten und druckfesten Behälter installiert, der mit Luft oder einem inerten Gas zur Vermeidung von Hochspannungsüberschlägen gefüllt ist.

Diese so gekapselte Plasmastrahlquelle ist in **Abb. 5** schematisch dargestellt.

In dem Quellengehäuse (**10**) befinden sich der Mikrowellengenerator (**2**), der Koaxialleiter (**3a, 3b**), der gegenüber der Bearbeitungskammer mittels der Vakuumdichtungen (**13**) abgedichtet ist und dessen offenes Ende, das gleichzeitig der Gasaustritt (**9**) ist, in die Bearbeitungskammer hineinragt. Der Gaseinlaß in den Innenleiter des Koaxialleiters (**3b**), der im Beispiel als doppelwandiges Rohr ausgebildet ist erfolgt über die Anschlüsse (**5**). Die Zuführung des Quellenfüllgases, im Beispiel Luft unter Atmosphärendruck, erfolgt über den Einlaß (**12**). Das Kühlwasser für die Kühlung des Mikrowellengenerators (**2**) wird über den Anschluß (**13**), der als Doppelrohrsystem ausgebildet ist, zu- und abgeführt. Die elektrischen Versorgungskabel und die Signalleitungen werden vakuumdicht an die Durchführungen (**11**) angeflanscht. Die Abstimmung des Mikrowellensystems erfolgt rechnergesteuert über den Kurzschlußschieber (**4**).

Patentansprüche

1. Verfahren zum Hochratebearbeiten von Materialoberflächen unter Verwendung einer Plasmastrahlquelle, **dadurch gekennzeichnet**, daß ein hochreaktiver Plasmastrahl definierter und skalierbarer Geometrie sowie hoher Dichte mit Hilfe eines Mikrowellenfeldes erzeugt wird, das sich am Ende eines nach einer Seite offenen, koaxialen Mikrowellenhohlleiters, bestehend aus einem Außenleiter und einem Innenleiter geeigneter Geometrie, ausbildet, wobei der Innenleiter des Koaxialleiters aus zwei oder mehreren konzentrisch zueinander angeordneten Röhren geeigneter Querschnitte aufgebaut ist, die Bildung des reaktiven Plasmastrahls durch Eindiffusion eines Gases, das über eines der äußeren Rohre zugeführt wird, in den durch Wechselwirkung eines Inertgasstromes mit dem Mikrowellenfeld gebildeten Plasmastrahl erfolgt, der dadurch gleichzeitig eine zeitlich und räumlich stabile Form erhält, daß dieses Gas entweder die chemisch reaktiven Spezies enthält bzw. daß solche in der Plasmaentladung aus mindestens einem seiner Bestandteile entstehen, daß der hochreaktive Plasmastrahl selbst keinen Kontakt mit dem System des Mikrowellenleiters bzw. des darin integrierten Gasführungssystems hat und damit gewährleistet ist, daß das Plasma keinerlei Wandwechselwirkung außer mit dem Substrat selbst eingeht und damit von Fremdverunreinigungen frei ist.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß mindestens eine Prozeßgaskomponente CF_4 , SF_6 , NF_3 oder XeF_2 ist und der Plasmastrahl Kontakt mit der Oberfläche des Substrates hat und dabei ein Ätzabtrag erfolgt. Der Querschnitt des Plasmastrahles ist dabei kleiner als der Querschnitt des Substrates.

3. Verfahren nach Anspruch 1 und 2 dadurch gekennzeichnet, daß das Trägergas der mikrowellenangeregten Plasmaentladung aus Ar oder He besteht.

4. Verfahren nach Anspruch 1, 2 und 3, dadurch gekennzeichnet, daß eine weitere Komponente des Prozeßgases O_2 ist.

5. Verfahren nach Anspruch 1, 2, 3 und 4 dadurch gekennzeichnet, daß das Verfahren bei einem Prozeßdruck von 10 mbar bis 1000 mbar in einem Gefäß, der Bearbeitungskammer, realisiert wird.

6. Plasmastrahlquelle nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß diese in einen gegenüber der Umgebung druck- und vakuumdicht gekapselten Behälter dergestalt eingebaut ist, daß das offene Teil des koaxialen Mikrowellenleitersystems und des im Innenleiter integrierten Gasführungssystems durch die Behälterwand nach außen hindurchragt.

7. Verfahren nach Anspruch 1, 2, 3, 4, 5 und 6, dadurch gekennzeichnet, daß die Plasmastrahlquelle sich gemeinsam mit den Substraten in der Bearbeitungskammer befindet.

8. Verfahren nach Anspruch 1, 2, 3, 4 und 5, dadurch gekennzeichnet, daß die Plasmastrahlquelle dergestalt in die Wand der Bearbeitungskammer eingebaut ist, daß sich die Quelle außerhalb der Bearbeitungskammer befindet und daß das offene Teil des koaxialen Mikrowellenleitersystems und das im Innenleiter integrierte Gasführungssystem in die Bearbeitungskammer hineinragt.

9. Verfahren nach Anspruch 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 und 8, dadurch gekennzeichnet, daß zur Oberflächenformgebung durch Ätzabtrag das Substrat sich in einem Substrathalter befindet und relativ zum Plasmastrahl mittels eines Mehrachsen-Bewegungssystems linear bewegt wird.

10. Verfahren nach Anspruch 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 und 8, dadurch gekennzeichnet, daß zum Erreichen einer Formgebung durch Ätzabtrag das Substrat sich in einem Substrathalter befindet und relativ zum Plasmastrahl mittels eines Mehrachsen-Bewegungssystems linear und rotierend bewegt wird.

11. Verfahren nach Anspruch 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 und 10, dadurch gekennzeichnet, daß zusätzlich die Plasmaquelle relativ zum Substrat durch Drehung und oder Kippung und oder Abstandsänderung bewegt wird.

12. Verfahren nach Anspruch 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 und 11, dadurch gekennzeichnet, daß der Substrathalter heizbar ist und das Substrat auf höhere Temperaturen als Zimmertemperatur gebracht wird.

13. Verfahren nach Anspruch 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 und 11, dadurch gekennzeichnet, daß der Substrathalter nicht heizbar ist.

14. Plasmaquelle nach Anspruch 1, 6 und 7, dadurch gekennzeichnet, daß in die Anordnung eine berührungslose Temperaturmeßeinrichtung zur Messung der Substrattemperatur integriert ist.

15. Plasmaquelle nach Anspruch 1, 6, 7 und 14, dadurch gekennzeichnet, daß in die Anordnung ein optisches Emissionspektrometer integriert ist.

16. Plasmaquelle nach Anspruch 1, 6, 7, 14 und 15, dadurch gekennzeichnet, daß das Ende des Innenleiters und das Ende des Außenleiters in einer Ebene liegen.

17. Plasmaquelle nach Anspruch 1, 6, 7, 14, 15 und 16, dadurch gekennzeichnet, daß das Ende des Innenleiters und das Ende des Außenleiters nicht in einer Ebene liegen.
18. Plasmaquelle nach Anspruch 1, 6, 7, 14, 15, 16 und 17, dadurch gekennzeichnet, daß der Innenleiter des genannten koaxialen Mikrowellenhohlleiters aus zwei oder mehr konzentrisch zueinander angeordneten Rohren aufgebaut ist und zwar so, daß zwischen den Rohren jeweils eine Lücke besteht, durch die ein Gas geführt werden kann.
19. Konfiguration nach Anspruch 1, 6, 7, 14, 15, 16, 17, und 18, dadurch gekennzeichnet, daß durch die genannten Rohre zwei oder mehr Gase oder Gasgemische getrennt an des Ende des genannten koaxialen Mikrowellenhohlleiters geführt werden und dort ausströmen.
20. Verfahren nach den Ansprüchen 1 bis 19, dadurch gekennzeichnet, daß der Plasmastrahl Kontakt mit der Oberfläche des Substrates hat und dort durch die Wahl entsprechend geeigneter Prozeßgaskomponenten eine Formgebung durch gezielten Materialauftrag erfolgt.
21. Verfahren nach den Ansprüchen 1 bis 20, dadurch gekennzeichnet, daß zwischen Plasmastrahl und Substrat strukturierte Wechsellmasken, die aus Al-Oxidkeramik sein können, bzw. Blenden gebracht werden und damit mit hoher Bearbeitungsgeschwindigkeit und Genauigkeit geometrische Strukturen eingearbeitet oder aufgetragen werden.
22. Verfahren nach den Ansprüchen 1 bis 21, dadurch gekennzeichnet, daß zum Korrosionsschutz empfindlicher elektronischer, optischer, optoelektronischer und mechanischer Baugruppen in der Bearbeitungskammer diese während der Bearbeitung mit einem inertisierenden bzw. abschirmenden Hintergrundgasdruck beaufschlagt wird, wobei dieser Druck erfindungsgemäß dadurch hergestellt wird, daß ein geeignetes Gas mit der Schutzwirkung über Leitungen und Öffnungen direkt in die Gehäuse der präzisionsmechanischen, elektronischen, optischen und optoelektronischen Komponenten eingelassen wird, von wo aus es durch vorhandene Öffnungen in den Raum der Bearbeitungskammer ausströmt. Das Schutzgas, daß Stickstoff aus einem Flüssiggastank sein kann, wird zusammen mit den anderen Gasbestandteilen in der Bearbeitungskammer über das Pumpsystem aus dieser entfernt.
23. Verfahren nach den Ansprüchen 1 bis 22, dadurch gekennzeichnet, daß zur Unterdrückung bzw. Ausschaltung des zerstörerischen, schädlichen Einflusses abgestrahlter, vagabundierender Mikrowellenenergie auf die Elektronikkomponenten und Kunststoffteile, die sich in der Bearbeitungskammer befinden, in dieser ein hinreichend dimensionierter Absorber für Mikrowellenstrahlung installiert wird, der ein in mehreren Windungen in einigen Zentimetern Abstand von der Kammerwand angebrachter und wasserdurchflossener Kunststoffschlauch sein kann.

Hierzu 4 Seite(n) Zeichnungen

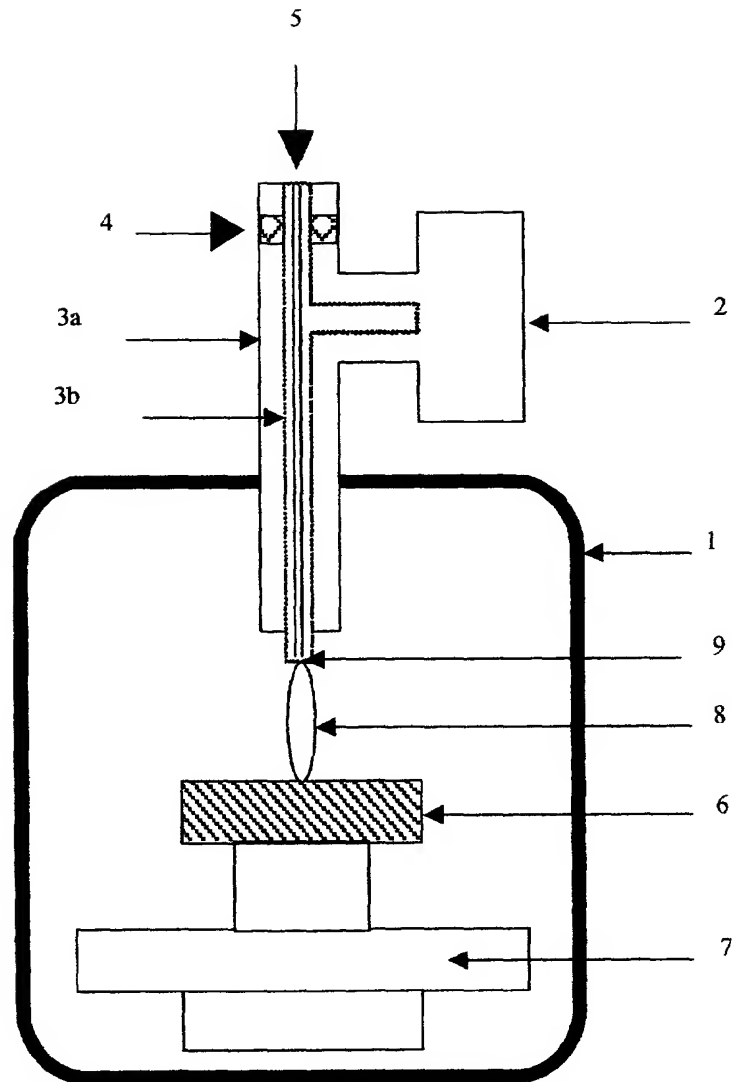


Abb. 1 Schematische Darstellung einer Anordnung zur Hochratebearbeitung mittels des Plasmastrahlverfahrens mit Anordnung der Plasmaquelle in der Wand der Bearbeitungskammer.

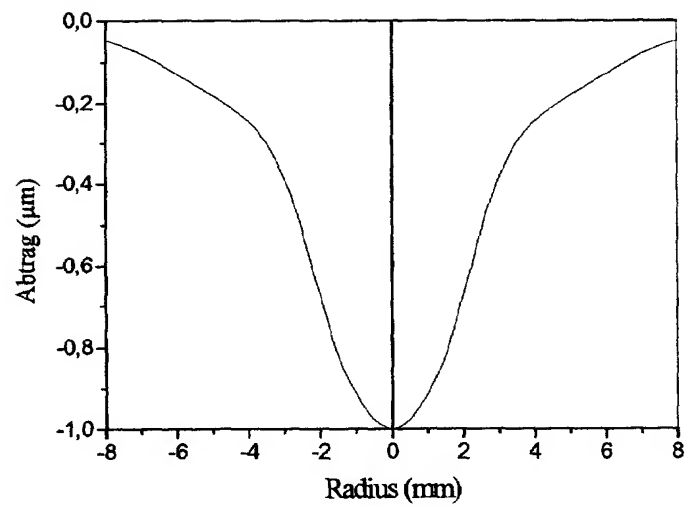


Abb. 2 Typisches Profil der lokalen Abtragsfunktion des reaktiven Plasmastrahls.

Tab. 1 Typische Prozeßparameter

Parameter	Einheit	Wert
Druck	mbar	100
Mikrowellenleistung	W	80
Gasfluß Ar	sl/min	0.3
Gasfluß SF ₆	sl/min	0.3

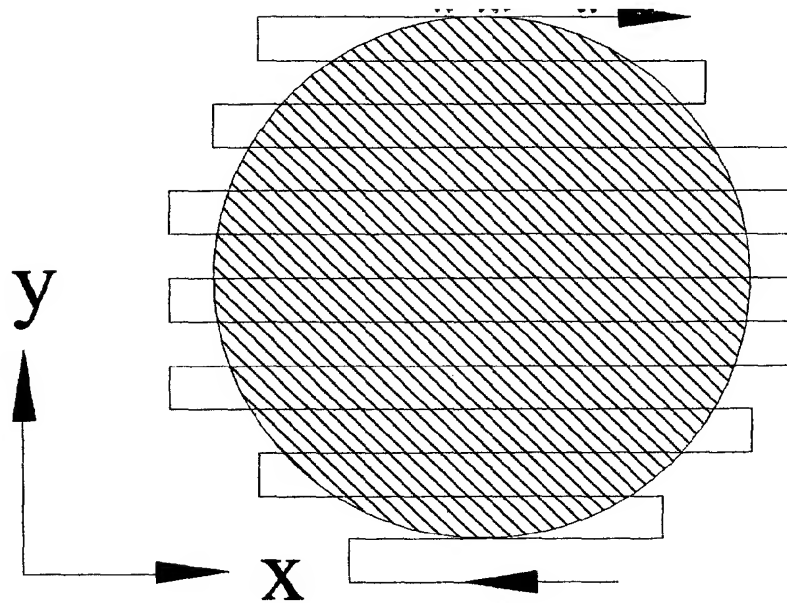


Abb. 3 Schematische Darstellung einer möglichen Bewegung des Werkstücks relativ zum Werkzeug realisiert über ein computergesteuertes x-y-Bewegungssystem.

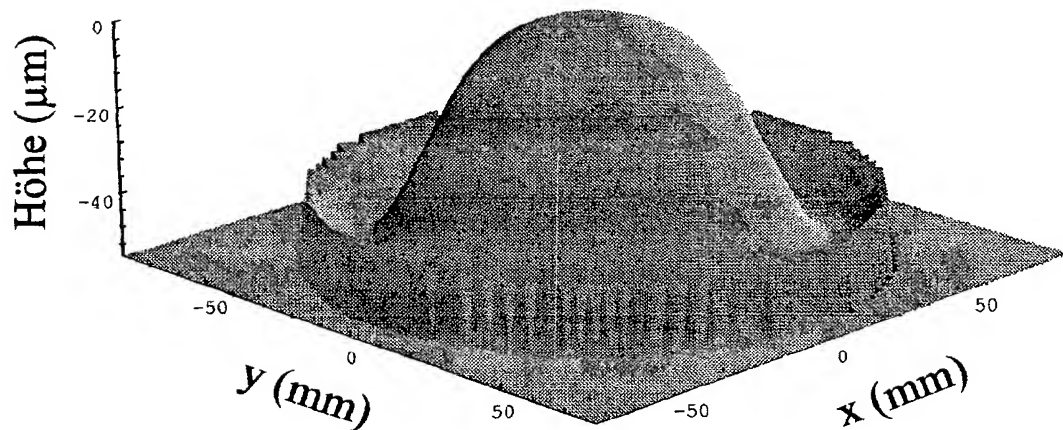


Abb. 4 Beispiel für eine mittels reaktivem Plasmastrahlätzen hergestellte Oberflächenform.

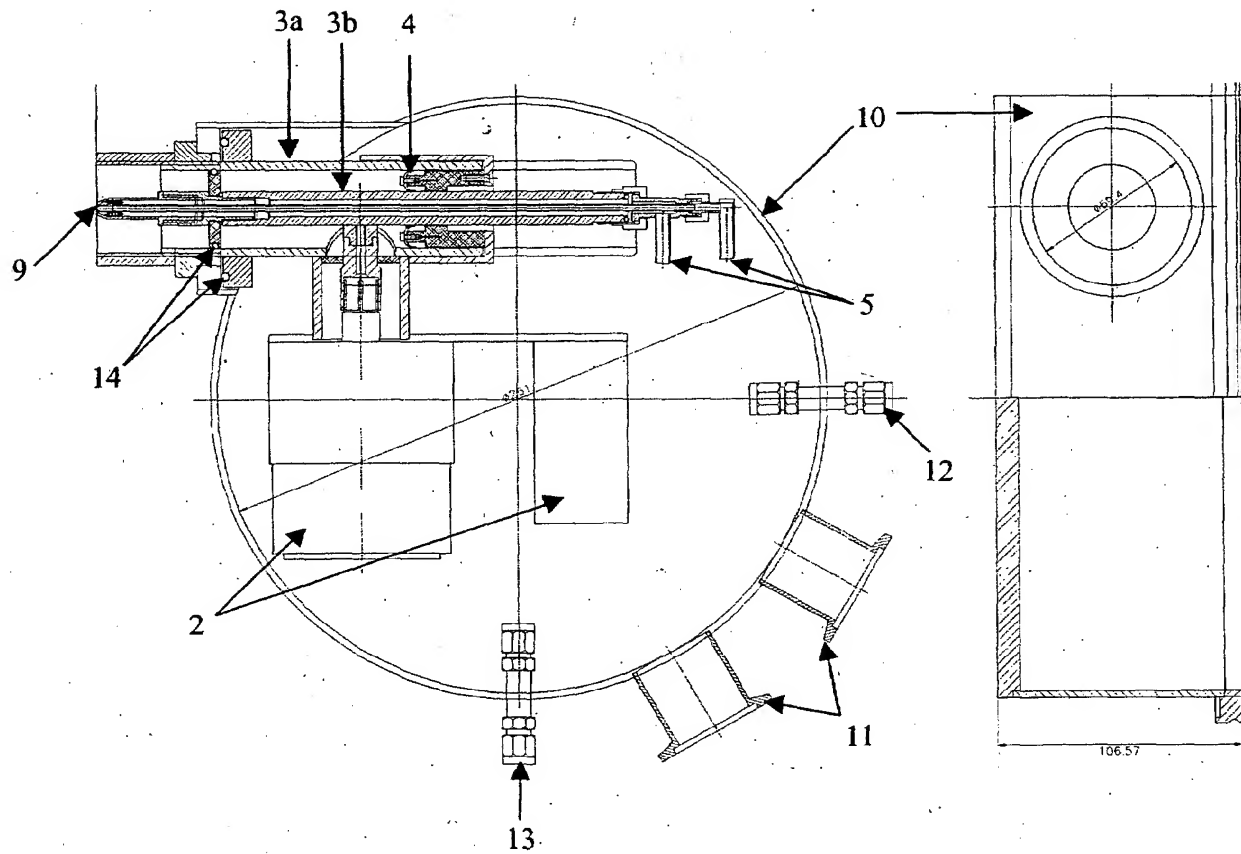


Abb. 5 Anordnung der Plasmaquelle in einem vakuumdichten und druckfesten Behälter